

Úvod do GNSS

Pavel Tesař

5. června 2007

Obsah

1	Úvod	2
2	Segmenty GNSS	2
2.1	Kosmický segment NAVSTAR GPS	2
2.1.1	Družicový signál	4
2.2	Kosmický segment GLONASS	6
2.3	Kosmický segment GALILEO	6
2.4	Řídící segment	7
2.5	Uživatelský segment	8
3	Výpočet polohy	8
3.1	Kódové měření	9
3.2	Fázové měření	10
4	Přesnost GNSS	11
4.1	DGNSS - Diferenční GNSS	13
5	Postup při geodetických měřeních s GNSS	13
5.1	Postprocessing - měření s pozdějším zpracováním	14
5.1.1	Typy měření	14
5.2	RTK - Real Time Kinematic	15
5.3	CZEPOS	16
5.4	Transformace mezi systémy	16
5.5	Ukládání dat	17
6	Slovnik GNSS pojmu	18

1 Úvod

V současnosti se v běžném životě stále častěji setkáváme s Globálními Navigačními Satelitními Systémy (GNSS), tedy systémy umožňujícími kdekoliv na Zemi v jakoukoliv denní dobu určit polohu uživatele. Ve skutečnosti existuje několik globálních navigačních satelitních systémů (Glonass, Galileo, DORIS, ...). Bezespouř největší význam pro, nejen geodetickou, praxi však má americký systém NAVSTAR GPS. Proto vznikl pojmenování GNSS, aby nebyl americký systém GPS zaměňován s ostatními navigačními systémy. Toto pojednání bude věnováno zejména americkému systému NAVSTAR GPS, základní principy a vlastnosti jsou však společné i pro ruský Glonass a budovaný evropský Galileo.

2 Segmenty GNSS

V této kapitole se budeme zabývat víceméně formálním rozdelením součástí GNSS nazývaných segmenty:

- kosmický
- řídící
- uživatelský

Ve změti historických dat a popisu systému bych upozornil zejména na podkapitolku věnovanou družicovému signálu.

Navstar GPS V roce 1973 rozhodlo americké ministerstvo obrany (U.S. Department of Defence) vyvinout a vybudovat nový družicový navigační systém, který by nahradil dopplerovský systém TRANSIT. Výsledkem tohoto rozhodnutí je současný NAVSTAR GPS. Slova "NAVSTAR GPS" jsou zkratkami anglického názvu "NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System". Prvotní důvody pro vývoj GPS byly rye vojenské, ale americký kongres vydal později pokyn, aby GPS byl zpřístupněn s určitými omezeními i civilním uživatelům.

2.1 Kosmický segment NAVSTAR GPS

První, tzv. kosmický segment je tvořen družicem GPS. Družice jsou umístěny v šesti rovinách na téměř kruhových oběžných drahách ve výšce přibližně 20200 km nad povrchem Země, se sklonem k rovníku 55° a oběžnou dobou asi 11 hodin 58 minut (12 hvězdných hodin). To znamená, že stejné družice jsou z určitého místa na Zemi vidět každý den asi o 4 minuty dříve. Družice se pohybují rychlosťí 11300 km/h.

Každá ze šesti drah má pět pozic pro umístění družic, z čehož plyne, že za současně konfigurace je maximální možný počet družic GPS na oběžné dráze roven počtu třiceti kusů. Pozice č. 5 je u každé dráhy záložní, pro dosažení FOC¹ postačuje 24 funkčních

¹Full Operational Capability, plná operační schopnost globálního polohového systému GPS. Byla vyhlášena 17. července 1995, po dosažení počtu 24 družic Bloku II a IIA na oběžné dráze a jejich

družic. Dokončená konfigurace tedy zajišťuje viditelnost minimálně 4 družic s elevací větší než 15° a to 24 hodin denně ze kteréhokoliv místa na Zemi.

Družice GPS jsou vybaveny vysílačem, atomovými hodinami, procesory a řadou dalších přístrojů sloužících k navigaci i k jiným vojenským úkolům (např. k detekci výbuchů jaderných náloží). Elektronické vybavení družic umožňuje uživatelům měřit topocentrické vzdálenosti k družicím a každý satelit vysílá zprávu o své prostorové poloze r . Družice jsou vybaveny slunečními bateriemi, setrvačníky pro udržování správné orientace a raketovými motory pro opravy dráhy. Od roku 1978 prošly družice GPS velkými změnami a rozsáhlou modernizací. V současnosti je v provozu již třetí generace a další dvě jsou ve vývoji. Nejstarším typem družic je tzv. **Blok I**. Družic tohoto typu bylo v letech 1978 až 1985 vyrobeno firmou Rockwell International 11 kusů, ale na oběžnou dráhu jich bylo z Vandenbergovy letecké základny v Kalifornii raketami řady Atlas E a F vyneseno jen deset. Dne 18. prosince 1981 byla jedna družice při neúspěšném startu zničena. Inklinace dráhy těchto družic byla 63° . Na palubě každé družice byla trojice atomových hodin – jedny s cesiovým a dvoje s rubidiovým standardem. Plánovaná životnost byla 4,5 roku, ale většina družic spolehlivě sloužila více než dvojnásobek této doby. Poslední družice Bloku I byla vyřazena z aktivní služby v listopadu 1995. V letech 1989 a 1990 byly opět firmou Rockwell International vyrobeny družice **Bloku II**. Všech devět vyrobených družic vynesly na oběžnou dráhu rakety Delta II z letecké základny na mysu Canaveral na Floridě. Oproti družicím Bloku I mají zlepšené odstínění před kosmickým zářením, oběžnou dráhu se sklonem 55° k rovině rovníku a jsou také prvními družicemi GPS, které jsou vybaveny přístrojem na detekci jaderných explozí. Navíc dokáží fungovat 14 dní bez nutnosti korekcí z pozemního řídícího střediska. Na palubě nesou čtvery atomové hodiny. Dvoje s cesiovým a dvoje s rubidiovým standardem. Plánovaná životnost je 7,3 roku, ale v současnosti ještě dvě družice Bloku II spolehlivě fungují (nejstarší dodnes funkční družice byla vypuštěna v prosinci 1989).

Dalším typem jsou družice z řady **Blok IIA**, vyráběné v letech 1990 až 1997. S Blokem II mají společného výrobce, stejné vybavení i stejnou životnost, ale dokáží samostatně pracovat bez nutnosti zásahů z pozemního řídícího střediska po dobu 180 dní, třebaže za cenu snížené přesnosti určení polohy. Některé na palubě nesou nově i laserový odražeč, který umožňuje velmi přesné zaměření polohy družice pomocí laserového paprsku vyslaného ze Země. Z 19 družic vyrobených a vynesených na oběžnou dráhu je jich dnes v provozu 16. Také družice Bloku IIA byly na oběžnou dráhu vyneseny raketou Delta II.

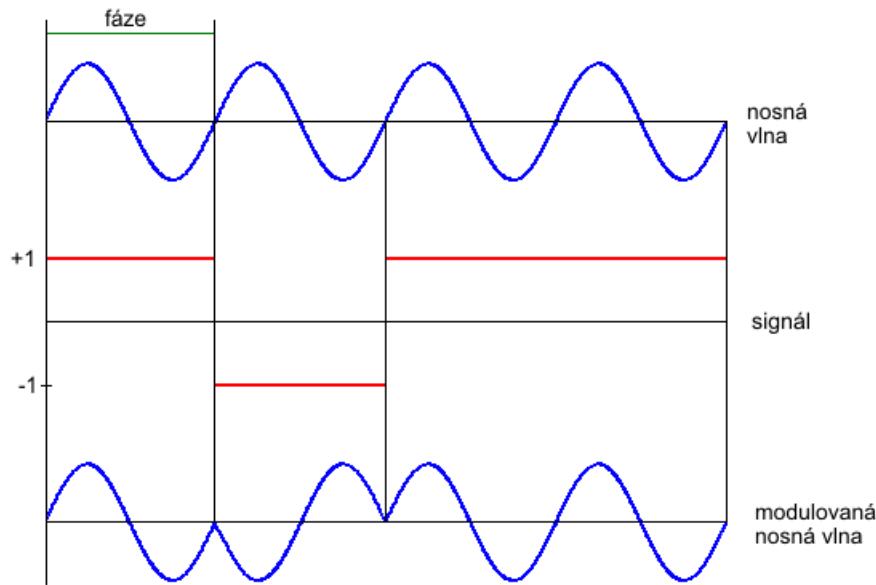
Nejmodernější typ družic GPS v současnosti umístěných na oběžné dráze představuje **Blok IIR**. Výroba začala v roce 1997 a poslední družice této typové řady byla vypuštěna 6. listopadu 2004. Firmou Lockheed Martin bylo vyrobeno třináct družic, ale na oběžné dráze jich pracuje jen dvanáct. První družice byla ztracena při neúspěšném startu 17. ledna 1997. Životnost družic Bloku IIR je plánována na 10 let. Největší změny oproti Bloku IIA jsou: opětovné zlepšení odstínění před kosmickým zářením, zvětšení zásob paliva pro raketové motory a přeprogramovatelný palubní počítač. Atomové hodiny jsou v družici troje, všechny s rubidiovým standardem. Nejdůležitější

důsledném testování. V obecném pojetí označení pro dostupnost dané technologie (frekvence, kódu) na 24 plně funkčních družicích GPS na oběžné dráze.

je ale schopnost samostatného fungování družice bez zásahu z pozemního řídícího střediska. Družice Bloku IIR spolu dokáží komunikovat, sledovat svoje pozice a korigovat své dráhy. Tato schopnost však zatím nemůže být využita, protože všechny družice by musely být typu Blok IIR. Zatím je možno u Bloku IIR využít jen schopnost stoosmdesátidenního samostatného provozu bez provádění korekcí z pozemního řídícího centra, podobně jako u družic Bloku IIA. Družice Bloku IIR byly na oběžnou dráhu vyneseny raketou Delta II z letecké základny na mysu Canaveral.

2.1.1 Družicový signál

Srdce každé družice tvoří velmi přesné atomové hodiny s cesiovým nebo rubidiovým standardem. Starají se o dlouhodobou frekvenční stabilitu vysílaného signálu. Takto je vytvářena základní frekvence L pásmo $f_0 = 10,23$ MHz. Koherentně odvozeny jsou nosné frekvence signálů L1 a L2, které vznikají vynásobením základní frekvence hodnotami 154 a 120, což dává $L1 = 1575.42$ MHz a $L2 = 1227.60$ MHz. Dvě sinusové nosné vlny L_1, L_2 s frekvencemi f_1 a f_2 jsou modulovány kódy a navigační zprávou a přenášejí tak čtení družicových hodin, dráhové parametry družice atd. Je používána tzv. dvoufázová modulace. Kódy $P(t)$, $C(t)$ a navigační zpráva $D(t)$ jsou pseudonáhodné (PRN-PseudoRandom Noise) posloupnosti číslic +1 a -1 a do nosné vlny jsou zaneseny tak, že při změně stavu se fáze vysílaného signálu změní o 180° . PRN kódy jsou pro každou družici unikátní a zajišťují přijímači GPS jednoznačnou identifikaci družice vysílající daný kód.



Obrázek 1: Modulace nosné vlny

Výsledný signál může být popsán rovnicemi:

$$L_1(t) = a_p P(t) D(t) \cos 2\pi(f_1 t) + a_c C(t) D(t) \sin 2\pi(f_1 t) \quad (1)$$

$$L_2(t) = b_p P(t) D(t) \cos 2\pi(f_2 t), \quad (2)$$

kde a_p , a_c a b_p jsou amplitudy signálů.

PRN Kódy PRN sekvence kódu jsou generovány pomocí kombinace výstupů z desetibitových posuvných registrů. Každý registr obsahuje deset buněk, z nichž každá představuje jeden bit. S každým pulsem atomových hodin se bity posunou doprava a hodnota bitu umístěného nejvíce vpravo je odečtena jako výstup z registru. Nová hodnota buňky umístěné nejvíce vlevo je určena binárním součtem hodnot dvou vybraných řídících buněk – hodnoty 0 nabývá v případě, že údaje v obou buňkách jsou stejné, v ostatních případech má hodnotu 1. Použití různých kombinací řídících buněk je rozhodujícím faktorem pro vytváření jedinečného PRN kódu každé družice.

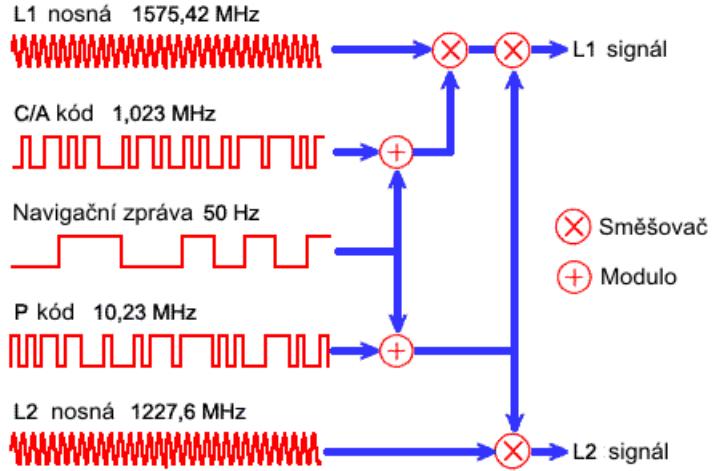
- **C/A**² je určen pro hrubé měření. Perioda C/A kódu trvá 1 ms a je dlouhý 1023 bitů. Časový interval mezi dvěma bity je tedy asi 1ms, za tu dobu urazí signál přibližně 300 m. C/A kód je modulován pouze na vlně L1.
- **P kód** je modulován na obou nosných vlnách L1, L2 a je určen pouze pro autorizované uživatele. Dvě frekvence používané k měření umožňují odstranění ionosférických a troposférických refrakcí, což zajistí velmi přesné určení polohy. Stejně jako C/A není P kód šifrován. Je vytvářen kombinací bitových sekvencí dvou registrů. První sekvence je opakována každou 1,5 s a vzhledem k frekvenci 10,23 MHz, má délku $1,5345 \cdot 10^7$ bitů, druhá sekvence je o 37 bitů delší. Jejich kombinací vzniká kód o délce $2,3547 \cdot 10^{14}$ bitů, což určuje dobu opakování P kódu na přibližně 266,4 dne. Časový interval mezi dvěma bity je desetkrát menší než u C/A kódu, což odpovídá přibližně 30 m v měřené vzdálenosti. Celá délka kódu je rozdělena na 37 částí. Každá družici je na jeden týden přidělena jedna z částí P kódu, čímž je docíleno rozdílných PRN družic. Vždy o sobotní půlnoci, kdy pro GPS začíná nový týden, dochází zároveň i ke změně vysílané části kódu. V případě fungování utajovacího režimu A-S (Anti-Spoofing) je P kód šifrován pomocí Y kódu (proto se také někdy označuje jako P(Y) kód), který vzniká jako součet P a W kódů. P kód tedy získáme pouze v případě, známe-li tajný W kód. S tím však pracují pouze vojenské přijímače.
- **Navigační zpráva** je posledním typem kódu vysílaného družicemi. Je vysílána frekvencí 50 Hz, její délka je 1 500 bitů a skládá se z pěti částí (subframů), každé po 300 bitech.

Obsah navigační zprávy

- Čas vysílání počátku zprávy
- Keplerovské efemeridy družice - k výpočtu polohy družice v čase t_i
- Almanach - údaje o poloze a stavu ostatních družic, což umožňuje vyhledat z příjmu signálu jediné družice signály ostatních

²tzv. Goldův kód, C/A - Course Acquisition, C/A znamenalo také volný přístup (Clear Access).

- Koeficienty ionosférického modelu k odstranění vlivu ionosférické refrakce
 - viz dále
- Stav družice (tzv. health) k posouzení hodnověrnosti přijaté zprávy



Obrázek 2: Družicový signál Navstar GPS

Složka	Frekvence [MHz]	
Základní frekvence	f_0	= 10.23
Nosná vlna L_1	$f_1 = 154 f_0$	= 1575.42 ($\lambda_1 \doteq 19.0$ cm)
Nosná vlna L_2	$f_2 = 120 f_0$	= 1227.60 ($\lambda_2 \doteq 24.4$ cm)
P-kód $P(t)$	f_0	= 10.23
W-kód $W(t)$	$f_0/20$	= 0.5115
C/A-kód $C(t)$	$f_0/10$	= 1.023
Navigační zpráva $D(t)$	$f_0/204600$	= $50 \cdot 10^{-6}$

2.2 Kosmický segment GLONASS

V krátkosti se zmíníme i o kosmickém segmentu dvou konkurenčních navaigačních systémů. Po dosažení plné funkčnosti počítá GLONASS se 24 družicemi na 3 drahách se sklonem k rovníku 64.8° a výškou ≈ 19100 km nad povrchem Země. V současnosti je však funkčních pouze cca 10 družic, což zajišťuje dostupnost - v Rusku 50.8% a ve světě 39.8%³.

2.3 Kosmický segment GALILEO

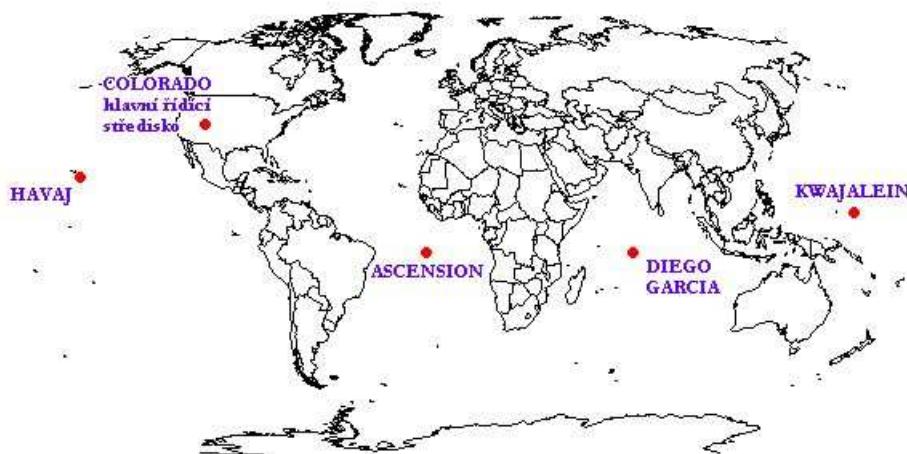
Galileo počítá s využitím 27 družic (+ 3 záložní) na 3 drahách se sklonem k rovníku 56° a výškou ≈ 23222 km nad povrchem Země. V současné době není ani jedna družice

³Alespoň 4 družice jsou viditelné 39.8% části dne kdekoli na Zemi.

Galileo funkční tak, aby vysílala datový signál.

2.4 Řídící segment

Řídící segment monitoruje funkci družic a předává jim údaje o dráze, chodu jejich hodin a další pomocná data. Tzv. *operační řídící systém* (Operational Control System – OCS) se skládá z jedné hlavní řídící stanice, pěti monitorovacích stanic a tří pozemních řídících stanic. Tento systém byl plně uveden do provozu v roce 1985. *Hlavní řídící stanice* se nachází v Colorado Springs. Shromažďuje měření z monitorovacích stanic a počítá efemeridy družic a parametry družicových hodin. Výsledky pak jdou do pozemních řídících stanic, které je ve vhodný okamžik předávají družicím. Tyto efemeridy slouží k navigaci v reálném čase (tzv. vysílané efemeridy). V Colorado Springs je zároveň jedna z pěti *monitorovacích stanic*. Další jsou na ostrovech Hawai (Tichý oceán), Ascension Island (jižní Atlantik), Diego Garcia (Indický oceán) a Kwajalein (Tichý oceán). Tyto stanice jsou vybaveny přesnými cesiovými časovými normály a přijímači P-kódu. Měření jsou předávána hlavní řídící stanici. Monitorovací stanice tvoří oficiální síť pro určování vysílaných efemerid a modelování chodu družicových hodin. Výsledky jsou modulovány do družicového signálu a jsou tak dostupné pro navigaci v reálném čase. Stanice Ascension Island, Diego Garcia a Kwajalein jsou zároveň tzv. *pozemní řídící stanice*. Jsou vybaveny prostředky pro komunikaci se satelity a předávají jim efemeridy a údaje o chodu jejich hodin, které byly vypočítány v hlavní řídící stanici. V současné době se tyto údaje předávají na družice jednou denně. Pro přesné geodetické a geofyzikální aplikace jsou zpravidla požadovány přesnější dráhy, než jsou vysílané efemeridy. Od roku 1992 určuje takové vysoce přesné (*precise*) dráhy civilní *Mezinárodní GPS služba pro geodynamiku – International GPS Service for Geodynamics (IGS)*. Tyto dráhy jsou se zpozděním přístupné na internetu.



Obrázek 3: Řídící segment Navstar GPS

2.5 Uživatelský segment

Uživatelský segment tvoří všechny přijímače GPS. Dnes již existuje mnoho typů, které lze dělit podle několika hledisek.

- podle použití
 - ruční nebo navigační (turistické)
 - tzv. geodetické
- podle počtu přijímaných frekvencí
 - jednofrekvenční
 - dvoufrekvenční
- podle počtu kanálů
 - jednokanálové - všechny družice jsou přijímány na jednom kanálu
 - vícekanálové - pro každou družici je rezervován jeden kanál (modernější konstrukce)
- podle schopnosti využívat kódová měření
 - kódové - jsou schopny generovat PRN kódy a měřit pseudovzdálenost (viz dále)
 - bez kódu - jsou schopny pouze obnovit původní nosnou vlnu a měřit fázi přijímaného signálu

3 Výpočet polohy

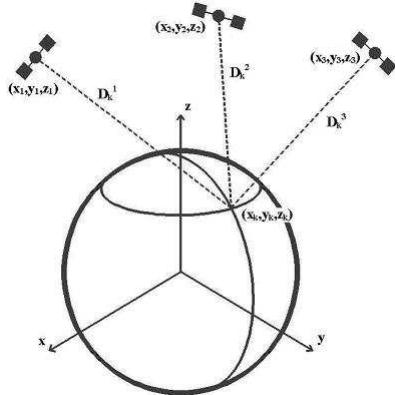
GNSS je pasivní⁴ dálkoměrný systém. Dálkoměrné systémy určují polohu přijímače pomocí vzdáleností od jednotlivých družic. Známe-li souřadnice družic (x_i, y_i, z_i) a vzdálenosti alespoň ke 3 družicím, můžeme polohu přijímače (x_k, y_k, z_k) určit vyřešením tří rovnic pro tři neznámé.

$$D_k^i = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2}, i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Prostorové protínání z délek určí 2 různé polohy přijímače. Pomineme-li "nesmyslné" určení polohy mimo zemský povrch, stačilo by teoreticky pro určení polohy přijímače využít signálů od 3 družic. To že tomu tak v praxi není si ukážeme v následujícím textu.

Polohu družic přijímač vypočítává z Keplerovských parametrů jejich druh (efemerid), které jsou obsahem tzv. navigační zprávy.

⁴Uživatel GNSS informace pouze přijímá (uživatelé nejsou vybaveni tzv. "odpovídacem" na dotaz družice, z jehož odpovědi řídící systém vypočítá polohu uživatele).



Obrázek 4: Výpočet polohy pomocí GNSS

3.1 Kódové měření

se používá u většiny levnějších přijímačů a je charakterizováno těmito vlastnostmi:

- méně přesné určení polohy (v řádu metrů),
- + k určení polohy stačí jedený přijímač,
- + polohu dokáže určit rychleji a je méně náchylné na přerušení signálu než fázové měření

Měření vzdáleností je nahrazeno měřením doby τ_{di} , potřebné k tomu, aby signál z družice dosáhl přijímače. Doba τ_{di} se v GPS určuje z rozdílu času přijetí signálu přijímačem t_k a čtení družicových hodin t^i v okamžiku odeslání signálu. Z tohoto rozdílu je možné vypočítat vzdálenost mezi družicí a přijímačem pomocí vztahu

$$D_k^i = c \cdot (t_k - t^i) = c \cdot \tau_{mi}, \quad (4)$$

kde

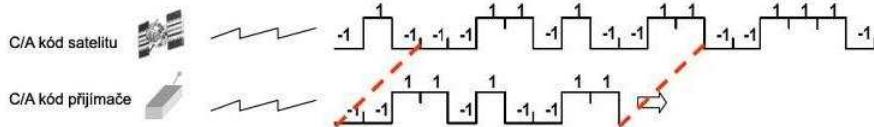
- $c = 299792458.0$ m/s je rychlosť světla,
- t_k je čtení hodin přijímače v okamžiku přijetí signálu,
- t^i je čtení hodin družice v okamžiku odeslání signálu,
- τ_{mi} je tedy měřená doba přenosu signálu.

Tato vzdálenost je však zatížena mnoha chybami, nazývá se tedy *pseudovzdáleností* (pseudorange) nebo také zdánlivou vzdáleností. Nejvýznamnější chybou je nesynchronnost časové základny systému (družice) a uživatele (přijímače). Časová základna přijímače (tzv. hodiny) je totiž posunuta o neznámý časový interval δ_k (tzv. chyba hodin přijímače), který můžeme přepočítat na vzdálenost $b = c \cdot \delta_k$. Pro určení polohy

musíme tedy přidat do rovnic (3) chybu hodin přijímače δ_k jako čtvrtou neznámou, z čehož vyplývá nutnost příjmu signálu od nejméně 4 družic současně.

$$\begin{aligned}\tau_{di} \cdot c &= \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + (z_i - z_k)^2} = d_i^k \\ &= (\tau_{mi} + \delta_k) \cdot c = D_i^k + b, \\ i &= 1, 2, 3, 4\end{aligned}\quad (5)$$

Měření zpoždění proběhne v GPS přijímači zhruba takto: Každá družice vysílá pseudonáhodnou posloupnost $C(t)$ nebo $P(t)$. Přijímač zachytí v čase t signál, který družice vyslala ve tvaru $C(t - \tau)$ nebo $P(t - \tau)$. Přijímač vytváří kopii vysílané pseudonáhodné posloupnosti a posouvá ji v čase o τ' . Tato posunutá kopie $C(t - \tau')$ nebo $P(t - \tau')$ je porovnávána s přijatým signálem. Posunutí, které bylo nutné k dosažení maximálního souhlasu (korelace) s přijatým signálem, je hledané zpoždění τ . Přijímače jsou schopné najít místo maximální korelace přibližně s 1% přesností, což odpovídá třímetrové přesnosti měřené vzdálenosti při použití C/A kódu a 30 cm při měření s P kódem. Nevýhodou tohoto určování zpoždění je nejednoznačnost způsobená periodicitou signálu. C/A kód má periodu 1 ms, nejednoznačnost v určení délky je tedy asi 300 km. Přijímač tedy potřebuje znát svoji přibližnou polohu⁵. V případě neznalosti přibližné polohy lze k rozšíření nejednoznačnosti použít datové bity s periodou 20 ms ($=> 6000$ km v určení vzdálenosti). O problému nejednoznačnosti měřené vzdálenosti při použití P kódu není, při délce jeho periody 266 dní (i když se používá pouze sedmidenní část), pro uživatele v blízkosti Země třeba mluvit.



Obrázek 5: Určení zpoždění u kódového měření

3.2 Fázové měření

- + přesnější než kódové měření (v řádu centimetrů až milimetrů),
- zpravidla nutnost současného měření 2 přijímačů,
- náchylné na přerušení signálu

Po určení zpoždění τ je navigační zpráva dekódována. Výsledkem je kromě pseudovzdálenosti D_k^i a navigační zprávy i demodulovaný, dopplerovský posunutý družicový signál, který je možné za určitých podmínek použít k přesnějšímu výpočtu polohy uživatele. Signál je opět korelován s jeho kopí, generovanou v přijímači. Přijímač tak zajišťuje rozdíl fáze přijatého signálu $\phi_k(t)$ a fáze signálu v čase vyslání družicí $\phi(t - \tau)$.

⁵tzv. počáteční inicializace

Hledaná vzdálenost D_k^i je potom dána součtem zlomku cyklu $\Delta\lambda$, získaného z rozdílu fází, a celkového počtu cyklů sinusové vlny mezi družicí a přijímačem vynásobeným vlnovou délkou signálu.

$$D_k^i = (n_{Fk}^i + \Delta\lambda) \cdot \lambda \quad (6)$$

Po zapnutí přijímače je spuštěn čítač, který počítá proběhnuté celé cykly sinusové vlny. Přijímač však není schopen rozpoznat počet cyklů, proběhlých před zapnutím čítače. Celkový počet cyklů n_{Fk}^i mezi družicí i a přijímačem k pro frekvenci F musí být tedy zahrnut do výpočtu jako další neznámá. Tato tzv. *počáteční fázová ambiguita* je velký problém při zpracování fázového měření. První přibližný odhad její velikosti poskytne vzdálenost vypočítaná kódovým měřením. Použitím tzv. trojitéch differencí mezi dvojicí přijímačů, dvojicí družic a dvojicí měření následujících po sobě je možné neznámou n_{Fk}^i eliminovat. Podmínkou je však nepřerušený příjem družicového signálu. Nesmí tedy dojít k tzv. *fázovému skoku*, kdy při přerušení signálu čítač nezaznamená určitý celý počet proběhlých cyklů. Tato podmínka je limitujícím faktorem pro fázové měření v zakrytém území (v lese, mezi zástavbou). Možností výpočtu neznámé n_{Fk}^i existuje kromě jmenovaných trojitéch differencí celá řada (např. použití lineárních kombinací měření na obou kmitočtech). Podrobnější výklad výpočtu ambiguít však přesahuje rámec tohoto pojednání. Problém řešení neznámých ambiguít při fázovém měření v podstatě znemožňuje určení polohy pouze jedním přijímačem. Používá se tedy dvojice přijímačů a určuje se jejich relativní poloha. Důvodem vyšší přesnosti měření s fází oproti měření kódovému je daleko kratší vlnová délka ($\lambda_1 \approx 19.0\text{cm}$, $\lambda_2 \approx 24.4\text{cm}$) než je délka kódu. Určí-li přijímač rozdíl fází opět s 1% nejistotou, dostáváme se v přesnosti měřené vzdálenosti D_k^i do řádu milimetrů.

4 Přesnost GNSS

Náhodné chyby systému GPS jsou složeny z chyby měřené vzdálenosti (pseudorange error) a hodnoty tzv. geometrické odchylinky od přesnosti (GDOP-Geometric Dilution of Precision).

Nosná vlna postupuje od družice k přijímači atmosférou, která ovlivňuje rychlosť šíření vln a tím i transitní čas, měřené pseudovzdálenosti a fázové rozdíly. Atmosféru se z hlediska šíření signálu dělí na dvě části, ionosféru a troposféru. Každá část ovlivňuje signál GPS jiným způsobem.

Mezi systematické chyby mající vliv na přesnost měřené vzdálenosti patří:

- Ionosférická refrakce** Ionosféra je část atmosféry ve výšce 50 až 1000 km nad povrchem Země. Tato část atmosféry obsahuje volné elektrony a chová se jako *dispersní* médium. Tedy *refrakční index* (a tím i rychlosť vlny) závisí na frekvenci signálu a na počtu volných elektronů v atmosféře. Ionosférická refrakce je tedy závislá na elevaci (minimálních hodnot nabývá při elevaci 90° - tedy v nadhlavníku) a na denní době (minimum v časných ranních hodinách, maximum kolem 14 hodin místního času), méně výrazná je závislost na roční době (maximum na podzim). Ionosférické zpoždění tedy závisí na sluneční aktivitě, která vykazuje jedenáctiletou periodicitu⁶, při kódovém měření naměříme vlivem io-

⁶Maximálních hodnot dosahovala aktivita Slunce v roce 2001.

nosféry delší vzdálenost, při měření s fází naměří přijímač vzdálenost o stejnou hodnotu kratší.

2. **Troposférická refrakce** - Troposféra je nižší část atmosféry, která způsobuje stejnou chybu měření na obou nosných vlnách pro kódová i fázová měření. Její vliv se eliminuje diferencováním a nebo se vliv troposféry zavádí jako další neznámá. Troposférická refrakce je závislá na vzdálenosti, kterou signál v troposféře urazí. Tedy opět na elevačním úhlu, ale i na nadmořské výšce přijímače.
3. **Nepřesná znalost dráhy družic** - efemeridy vysílané v navigační zprávě, používané pro polohy družic v přijímači, mají charakter předpovědi pro několik nejbližších hodin. Na internetu jsou s určitým zpožděním k dispozici zpřesněné dráhy družic⁷, které však logicky není možné použít k navigaci v reálném čase. Tyto zpřesněné efemeridy mají však význam až pro velmi přesné geodetické práce.
4. **Chyba družicových hodin** - na družicích jsou umístěny velmi přesné atomové hodiny. Tato chyba dosahuje daleko menších hodnot než chyba hodin přijímače. Kromě toho jsou v navigační zprávě k dispozici parametry pro výpočet aktuální velikosti této chyby, což umožňuje vliv chyby hodin družice v podstatě eliminovat.
5. **Variace fázového centra antény** - geometrická vzdálenost D_k^i není vztažena ke geometrickému středu antény. Opět má vliv až pro velmi přesné geodetické práce.
6. **Multipath** - vícecestné šíření signálu v důsledku odrazu od různých ploch v blízkosti přijímače (zástavba, lesní porost, ...). Geodetické přístroje používají anténu s tlumícím prstencem, zmírňujícím účinky vedlejších odrazených signálů od objektů pod anténou. Tato technika však neovlivňuje účinky vedlejších odrazů od objektů nad úrovni antény.

K odstranění chyb 1.-4., včetně chyby hodin přijímače, se používají již zmiňované diference a lineární kombinace měření. Při výpočtu pomocí diferencí se poloha určuje pouze relativně, určení absolutních souřadnic by vedlo k singulárnímu systému normálních rovin. Při relativním určování polohy dvou přijímačů se vliv těchto chyb zvyšuje v závislosti na vzdálenosti obou stanic. Určujeme-li absolutní polohu v reálném čase a pouze na jedné frekvenci, odstraňuje přijímač vliv ionosférické refrakce z modelu obsaženém v navigační zprávě.

SA (Selective Availability) Na tomto místě se sluší připomenout chybu, která měla donedávná největší vliv na přesnost určení polohy civilním uživatelem. Jedná se o SA (Selective Availability - výběrový přístup), který spočíval v záměrné změně vysílaných údajů družicových hodin a efemerid v navigační zprávě, čímž došlo k zhoršení přesnosti měřené vzdálenosti. Režim SA byl zaveden 25.3.1990 a ukončen 1.5.2000.

⁷Přesnost polohy družice, vypočtené z vysílaných (broadcast) efemerid, se pohybuje v řádu metrů. Pomocí zpřesněných efemerid se přesnost polohy družice dostane do řádu decimetrů.

GDOP (Geometrical Dilution of Precision) GDOP je ukazatelem kvality geometrického rozložení družic nad obzorem v okamžiku měření. Čím více viditelných družic, které jsou od sebe co nejvíce vzdáleny, tím menší hodnota DOP a vyšší kvalita měření. GDOP je bezrozměrné číslo. Dosažitelná minimální hodnota GDOP je rovna jedné. Při výpočtu polohy dostáváme z rovnic oprav tzv. normální rovnice. Inverzí matic normálních rovnic získáme čtvercovou kovarianční matici. Odmocnina ze stopy této matice je námi hledaná veličina DOP. Členy na hlavní úhlopříčce jsou mocniny směrodatných odchylek jednotlivých neznámých.

$$GDOP = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}, \quad (7)$$

kde

σ_0 je jednotková směrodatná odchylka.

Sledování velikosti DOP mělo význam především v době, kdy nebyl dostatečný počet družic a bylo nutno plánovat časy observací. Hodnoty GDOP jsou zobrazovány na většině GPS přijímačů.

4.1 DGNSS - Diferenční GNSS

Jednou z možností jak zlepšit přesnost určení polohy GNSS přijímačů pomocí **kódového** měření je tzv. DGNSS⁸. Na bodě o známých souřadnicích stojí jeden GNSS přijímač - tzv. *referenční stanice* - a přijímá data od družic. Díky znalosti vlastní přesné polohy je tato stanice schopna vypočítat správnou hodnotu vzdálenosti ke družici. Rozdíl změřené pseudovzdálenosti a vypočtené vzdálenosti je v podstatě vliv atmosféry na měřenou vzdálenost. Tyto hodnoty - *korekce* - referenční stanice předává dalším přijímačům, které si pak své změřené pseudovzdálenosti ke konkrétním družicím o tyto hodnoty opraví. Opravy je možné přijímačům dodávat buď on-line⁹ pro zpřesnění polohy v reálném čase nebo off-line¹⁰ pro pozdější zpracování měření (tzv. postprocessing). V druhém případě musí být oba přijímače schopny ukládat měřené pseudovzdálenosti (tzv. raw-data).

Pomocí DGNSS lze u kódového měření dosáhnout až decimetrové přesnosti v určení polohy. Se zvětšující se vzdáleností od referenční stanice přesnost vlivem různých atmosférických podmínek klesá.

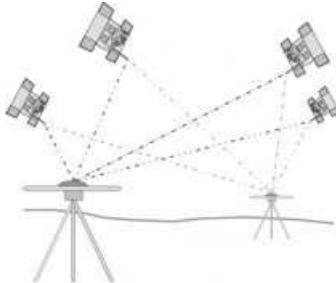
5 Postup při geodetických měřeních s GNSS

V geodézii se prakticky vždy používá relativní způsob určování polohy pomocí fázového měření, kdy současně měří nejméně dva přijímače a výsledkem je *relativní poloha* těchto přijímačů.

⁸Differential GNSS

⁹Pomocí Internetu nebo jinou komunikační linkou. Ve formátu uvedeném v dokumentu RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services), v případě distribuce přes internet v "obálce" NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol).

¹⁰Ve formátu RINEX(Receiver INdependent EXchange format)



Obrázek 6: Princip diferenčního GNSS

5.1 Postprocessing - měření s pozdějším zpracováním

- výsledky máme až po zpracování v kanceláři,
- + levnější přijímače než pro měření s RTK
 - <= jednodušší software (žádné výpočty, pouze ukládání dat),
 - <= není třeba komunikace mezi referenčním stanicí a roverem
- + referenční stanice nemusí stát na bodě o známých souřadnicích

Jeden přijímač zůstává na referenční stanici po celou dobu měření. Druhý přijímač přechází postupně mezi určovanými body. Pokud jsou požadovány výsledné souřadnice určovaných bodů v jiném systému než je WGS-84 např. S-JTSK, je nezbytné měřit rovněž na minimálně 3 bodech se známými souřadnicemi v druhém systému. Tak získáme souřadnice identických bodů pro výpočet lokálního klíče sedmiprvkové Helmertovy transformace.

Je třeba si uvědomit, že výsledkem zpracování fázového měření jsou pouze relativní vztahy (vektory) mezi měřenými body. Pokud chceme získat absolutní souřadnice bodů měřené sítě, je třeba dodat souřadnice alespoň jednoho bodu tak, aby mohla být celá síť umístěna do systému. Programy pro zpracování fázových měření použijí většinou, pokud jim absolutní souřadnice sami nedodáme, souřadnice určené kódovým měřením, které však mají přesnost pouze v řádu metrů. Chceme-li přesnější absolutní umístění sítě, musíme absolutní souřadnice získat jiným způsobem¹¹.

5.1.1 Typy měření

Při tzv. *statické metodě* měří nejméně dva (ale zpravidla více) přijímače současně po dobu několika hodin či ještě delší dobu. Statická metoda poskytuje nejpřesnější výsledky. Používá se pro budování polohových základů, při sledování deformací nebo v geodynamických sítích.

¹¹ Např. na <http://dataz.cuzk.cz> vyhledat nějaký bod se souřadnicemi v ETRS-89 (systém velmi blízký WGS-84) a daný bod zaměřit.

Rychlá statická metoda je ekonomičtější variantou metody statické a do nástupu přijímačů s RTK režimem byla pravděpodobně nejčastěji používanou metodou v geodézii. Hodí se zejména pro zhušťování bodových polí. Doba observace na bodech je zkrácena na 10–30 minut podle typu přístroje (podstatné je zejména, zda jde o přístroj jednofrekvenční či dvoufrekvenční), vzdálenosti mezi přijímači (délky základny) a konfigurace družic v okamžiku měření. Doba měření je dána minimální dobou nutnou k bezpečnému vyřešení ambiguit. Po jejich vyřešení je přesnost určených souřadnic dostatečná (centimetrová) i z velmi krátkých observačních intervalů. Moderní přístroje zpravidla automaticky signalizují, že měření trvalo dostatečně dlouhou dobu a je možné jej ukončit.

Metoda stop and go je způsob měření podobný rychlé statické metodě, ale s tím rozdílem, že přijímač nepřestává měřit ani při přesunu mezi jednotlivými podrobnými body. Tato metoda má tu výhodu, že jen na prvním bodě je nutno setrvat tak dlouho, dokud není možné spolehlivě vyřešit ambiguity (řádově desítky minut podle typu přístroje). Na zbývajících bodech je možno měření zkrátit na několik sekund za předpokladu, že během přesunu nedošlo ke ztrátě signálu a ambiguity se nezměnily. Metoda je teoreticky velmi elegantní, ale právě posledně zmíněný předpoklad je v praxi často těžko splnitelný. V případě ztráty signálu přechází metoda stop and go v rychlou statickou metodu. Metoda stop and go je vhodná k zaměřování podrobných bodů v terénu bez překážek omezuječích viditelnost satelitů.

Kinematická metoda s inicializací je podobná metodě stop and go. Počáteční inicializace (vyřešení ambiguit) proběhne podobně jako při rychlé statické metodě. Poté se jeden z přijímačů dává do pohybu a provádí měření v krátkém časovém kroku (např. jedné sekundy). Podmínkou je, že pohybující se přijímač nesmí ztratit během měření signál. V opačném případě je nutno opakovat inicializaci.

Výše zmíněnou nevýhodu – nutnost opakovat inicializaci – se pokouší odstranit **kinematická metoda bez inicializace**. Tato metoda vychází z předpokladu, že ambiguity je možno určit na základě *přesných kódových měření* i při pohybu přijímače (on-the-fly ambiguity resolution).

5.2 RTK - Real Time Kinematic

- + výsledky v reálném čase,
- dražší přijímače než pro postprocessingové měření
- <= nutný software pro výpočet ambiguit v reálném čase,
- <= software i hardware¹² pro komunikaci mezi referenčním stanicí a roverem
- referenční stanice musí stát na bodě o známých souřadnicích¹³

¹²Dříve většinou radiomodem, v současnosti se používá komunikace přes Internet protokolem NTRIP

¹³Tyto souřadnice jsou potom vždy přičteny k aktuálně vypočtenému vektoru => absolutní souřadnice roveru.

5.3 CZEPOS

V současné době je na území České republiky již v plném provozu síť referenčních stanic CZEPOS. Jde o společný projekt ZÚ (Zeměměřického úřadu) v Praze, VÚGTK (Výzkumného ústavu geodetického, topografického a kartografického) a ČÚZK (Českého úřadu zeměměřického a katastrálního) - více na: <http://czepos.cuzk.cz>.

CZEPOS poskytuje registrovaným uživatelům tyto služby:

- data pro postprocessingové zpracování
- DGNSS korekce pro zpřesnění kódového měření v reálném čase
- RTK data pro fázové měření v reálném čase

Většina geodetických firem si tedy v současnosti pořizuje pouze jeden GNSS přijímač a jako referenční stanice používá data sítě CZEPOS.

5.4 Transformace mezi systémy

Systémem NAVSTAR GPS je používán geocentrický souřadný systém **WGS 84** (World Geodetic System) - Světový geodetický systém z roku 1984, který poskytuje údaje ve tvaru zeměpisné šířky φ a délky λ . Systém WGS 84 pracuje z kartografického hlediska s parametry elipsoidu WGS 84¹⁴.

Obecný postup transformace mezi systémy:

1. Nejdříve musíme pomocí zobrazovacích¹⁵ rovnic převést rovinné souřadnice X,Y konkrétního systému (např. S-JTSK, S42) na zeměpisné φ , λ na konkrétním elipsoidu (S-JTSK používá Besselův elipsoid, S42 Krasovského elipsoid).
2. Zeměpisné souřadnice převedeme na kartézské souřadnice X,Y,Z.
3. Pomocí sedmiprvkové Helmertovy transformace získáme kartézské souřadnice X',Y',Z' již v novém systému.
4. Kartézské souřadnice X',Y',Z' převedeme na zeměpisné φ' , λ' .
5. Výsledné rovinné souřadnice v novém systému získáme opět pomocí zobrazovacích rovnic konkrétního kartografického zobrazení.

¹⁴Rozdíly zeměpisných souřadnic WGS 84 oproti vojenskému souřadnicovému systému S42 (požívajícímu Krasovského elipsoid) jsou na území ČR přibližně 100 - 150 m. S42 je používán např. na turistických mapách.

¹⁵Postup výpočtu rovinných souřadnic, v konkrétním kartografickém zobrazení, ze zeměpisných souřadnic a naopak.

Problémy transformací

- **S-JTSK** - Výše popsaný transformační postup je sice exaktní, naráží však na problém poměrně velkých lokálních deformací S-JTSK, neexistuje tedy jediný globální transformační klíč¹⁶ Helmertovy sedmiprvkové transformace pro celé území ČR. Pro geodetické práce se proto pro každé území vypočítavá lokální transformační klíč z měřených dat na identických bodech.
- **S42** - U kvalitnějšího Systému 1942 však nastává jiný problém. S42 je systém vojenský, transformační klíče tedy stále podléhají vojenskému utajení. Zveřejňované transformační klíče tedy opět zaručují pouze metrovou přesnost.

5.5 Ukládání dat

Pro pozdější zpracování měřených dat (tzv. *postprocessing*) bylo vyvinuto několik formátů. Mezi nejpoužívanější patří RINEX (*Receiver INdepenedend EXchange format*). Používají se dvě formy tohoto formátu - navigační (informace o poloze družic, koncovka .XXn¹⁷) a observační (měřená data - pseudovzdálenosti a fázová měření, koncovka .XXo). Pro ukládání zpřesněných souřadnic družic je určen formát SP3. V ručních GPS přijímačích se používá textový protokol NMEA.

Stručný popis formátu RINEX Ve formátu RINEX (*Receiver INdepenedend EXchange format*) jsou uchovávány, kromě jiného, data z GPS přijímačů. Formát RINEX byl vyvinut, aby bylo možno ukládat a následně zpracovávat data z různých typů přijímačů a různými software. Soubory v tomto formátu jsou ASCII, maximální délka řádku je 80 znaků. Soubor je striktně formátovaný, záleží tedy na poloze na znaků řádce. Soubor lze rozdělit na dvě základní části - hlavičku a vlastní tělo s daty. V hlavičce jsou zapsány obecné údaje o obsahu souboru a končí řádkem END OF HEADER. Následuje tělo souboru. Zde je uveden příklad takového souboru včetně stručného popisu.

0	1	2	3	4	5	6	7	8
12345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890								
1:	2	OBSERVATION DATA	GPS	RINEX VERSION / TYPE				
2:	GEOTRACER GPS Decoder Ver. 2.2		24-Jun-1999, 00:25	PGM / RUN BY / DATE				
3:	WETTZELL-1202			MARKER NAME				
4:	14201M010			MARKER NUMBER				
5:	Automatic	BKG-Wettzell		OBSERVER / AGENCY				
6:	322	AOA SNR-8000 ACT	3.3.32.2	REC # / TYPE / VERS				
7:	400	AOAD/M_T		ANT # / TYPE				
8:	4075582.4460	931854.7645	4801569.1074	APPROX POSITION XYZ				
9:	0.0715	-0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N				
10:	1	1	0	WAVELENGTH FACT L1/2				
11:	4	C1	P2	# / TYPES OF OBSERV				
12:	30		L1	INTERVAL				
13:	1999	6	23	TIME OF FIRST OBS				
14:	1999	6	23	23	59	30.000000	TIME OF LAST OBS	

¹⁶Globální transformační klíč zaručuje pouze metrovou přesnost.

¹⁷XX - aktuální rok

```

15:                                         END OF HEADER
16: 99 6 23 0 0 0.0000000 0 8G02G05G07G08G09G21G23G26
17: 22958623.93508 22958626.34708 -10345175.45408 -8061147.78008
18: 23608576.68307 23608581.18207 -7429583.14707 -5789271.57007
19: 22031495.36209 22031497.48709 -16236161.67509 -12651537.78509
20: 23760251.41306 23760253.73506 -6312777.48306 -4919037.86906
21: 20740748.11509 20740749.59309 -22186198.31309 -17287920.97909
22: 24563613.24906 24563618.04706 -4804189.47206 -3743524.26506
23: 23116977.01607 23116979.83007 -13077053.39507 -10189898.15007
24: 20825415.58609 20825417.45709 -20610026.28609 -16059734.62909
25: 99 6 23 0 0 30.0000000 0 8G02G05G07G08G09G21G23G26
.
.
.

```

Řádky 1–15 jsou řádky hlavičky. Od 61. pozice na řádku je uveden popis údajů, které řádka obsahuje. Význam jednotlivých řádek lze intuitivně pochopit. Zde jde o soubor ze stanice WETTZELL-1202, jejíž unikátní označení je 14201M010. Stanice je vybavena přijímačem AOA SNR-8000 ACT a anténou AOAD/M_T. Přibližné souřadnice v systému WGS-84 jsou uvedeny na řádce APPROX POSITION XYZ. Důležitý je řádek s označený # / TYPES OF OBSERV, popisující kolik a jaké typy observací jsou v souboru ukládány. V tomto případě přijímač měřil – C/A-kód na nosně vlně L1 (C1), P-kód na nosně vlně L2 (P2) a prováděl fázová měření na obou frekvencích (L1, L2). V tomto pořadí jsou ukládána data v těle souboru.

Tělo souboru začíná řádkem 16. Na tomto řádku je uvedeno datum observace (26.3.1999) a čtení hodin přijímače v okamžiku příjmu signálu (*0h 0min 0.00s*). Čas je uváděn v systému GPS, k tomuto času jsou vztaženy i efemeridy družic. Dále na 29. pozici na řádku je celé číslo popisující stav. Stav 0 znamená, že následují měřená data. V pozicích 30–33 je uveden počet observovaných družic (zde 8) a hned následuje jejich označení písmenem a číslem. Označení G není povinné a značí, že jde o družici systému GPS (narozdíl od ruského systému GLONASS). V pořadí, v jakém jsou uvedena označení družic, jsou dále uváděny observace na jednotlivé družice. Řádky 17–24 obsahují vlastní měřená data. Řádka 17 přísluší družici s označením G02 a data jsou uložena v pořadí C1, P2, L1, L2, které odpovídá pořadí uvedeném v hlavičce. Data z observace na družici G05 jsou na řádce 18 atd. Hodnoty jsou uloženy ve sloupcích 1–14, 17–30, 33–46, 49–62, Pseudovzdálenosti jsou ukládány v metrech, fázová měření v cyklech. Na pozicích 15, 31, 47, ... jsou uloženy hodnoty LLI (*Loss of Lock Indicator*), které dále popisují observovaná data podobně jako hodnoty ve sloupcích 16, 32, 48, ... popisující sílu signálu.

6 Slovník GNSS pojmu

- *NAVSTAR GPS* – Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System, oficiální název pro polohový systém USA.
- *FOC* – Full Operational Capability, plná operační schopnost globálního navigačního satelitního systému GNSS. U NAVSTAR GPS byla vyhlášena 17. července 1995, po dosažení počtu 24 družic Bloku II a IIA na oběžné dráze a jejich

důsledném testování. V obecném pojetí označení pro dostupnost dané technologie (frekvence, kódu) na 24 plně funkčních družicích GPS na oběžné dráze. Konkureční systémy GLONASS a Galileo FOC ještě nedosáhly.

- *Autorizovaný uživatel* – má přístup k vojenským kódům GPS. Jde především o ozbrojené složky USA a jejich spojenců. V ”bezpečných” zemích je přístup k vojenským kódům povolen i pro civilní geodetické účely.
- *A-S* – AntiSpoofing, způsob ochrany vojenského P kódu GPS před případným podvržením nebo zneužitím nepřítelem. Bez použití režimu A-S není P kód nijak šifrován a není tak zaručena jeho stoprocentní autentičnost a integrita. Z tohoto důvodu je režim A-S je neustále zapnut a místo P kódu je vysílán šifrováný Y kód. Klíčem k jeho rozluštění je W kód, podporovaný pouze v autorizovaných přístrojích, které z Y a W kódů vytvoří P kód použitelný pro navigaci
- *PRN Code* – Pseudorandom Noise Code, pseudonáhodný fázový šum (kód). Moduluje nosnou vlnu signálu GPS, pro každou družici je unikátní. Představiteli PRN kódu jsou například kódy C/A nebo P(Y).
- *Almanach* – jedna ze složek signálu GPS – součást navigační zprávy. Obsahuje méně přesná data o poloze družic GPS. Aktualizován je jednou za šest dnů. Všechny družice vysílají stejný almanach, který nese data o poloze všech družic GPS na oběžné dráze.
- *Efemeridy* – součást navigační zprávy pro GPS obsahující data o poloze dané družice. Jsou vytvářeny Hlavním řídícím střediskem GPS, které je průběžně vypočítává na základě sledování druhů družic pozemními stanicemi. Jednou za 2 hodiny je aktualizované vysílá jednotlivým družicím, které je zahrnují do svých navigačních zpráv. Platnost efemerid trvá nanejvýše čtyři hodiny.

Reference

- [1] Mervart, L., Cimbálník, M. Vyšší geodézie 2. ČVUT
- [2] Lukeš, Z. GPS - poznámky k úloze z VG21.
- [3] Tesař, P. Použití ručních GPS pro mapování - diplomová práce.
- [4] Vývoj metod a technologií GPS v geodézii - sborník referátů, Brno 2005.
- [5] www.aldebaran.cz/bulletin/